

整体壁板结构弹塑性弯曲中性层位置分析

赖松柏¹ 陈同祥¹ 于登云²

(1 中国空间技术研究院,北京 100094)

(2 中国航天科技集团公司,北京 100037)

文 摘 中性层位置是壁板结构设计和分析及其弯曲成型工艺的重要参数,工程上将截面形心作为弹塑性弯曲中性层位置的方法存在很大误差。通过弹塑性分析,考虑了材料塑性强化效应,建立了一种便捷的计算整体壁板结构弹塑性弯曲中性层位置的方法,并和数值仿真结果进行了对比,分析结果表明:弹性弯曲时,中性层位于截面形心;而进入塑性弯曲阶段,中性层位置随着弯曲半径的减小向蒙皮方向显著移动;在整体壁板常用的相对弯曲半径下($\rho/t \geq 10$),壁板的变薄可以忽略不计,应力中性层和应变中性层几乎重合。

关键词 整体壁板结构,弹塑性弯曲,塑性强化,中性层,数值仿真

Analysis of Neutral Surface Position of Integrally Stiffened Panel in Elastoplastic Bending

Lai Songbai¹ Chen Tongxiang¹ Yu Dengyun²

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(2 China Aerospace Science and Technology Corp., Beijing 100037)

Abstract The position of neutral surface of integrally stiffened panel is important for parameter design and structural analysis, together with bending process. In engineering, the centroid is treated as the position of integrally stiffened panel in elastoplastic bending, and there is large error for this method. In this work, a new method for the calculation of neutral surface position is set up, considering the strain-hardening of a material, and the result is compared with that of numerical simulation. Result shows: the neutral surface of integrally stiffened panel in elastic bending lies in the centroid, and it moves to skin side as bending radius getting smaller in plastic bending; when the relative bending radius is small ($\rho/t \geq 10$), thinning of panel is ignorable, and neutral surface of stress and strain lie at almost the same position.

Key words Integrally stiffened panel, Elastoplastic bending, Strain-hardening, Neutral surface, Simulation

0 引言

整体壁板结构由于具有优良的结构效率和性能,在飞机机身机翼、火箭贮箱、空间站密封舱等结构中得到广泛应用。

壁板在弯曲成形过程中存在一中性层(在相对弯曲半径 ρ/t 较大时工程上都认为应力中性层和应变中性层重合),该层上的材料应力和应变为0,其长度在变形前后保持不变。中性层位置是壁板结构的一个重要的基本参数,对力学分析有着重要的影响,也是坯料展开长度及其部件位置计算的关键参数,对壁板成形精度和后续零部件装配精度影响很大。

目前,通常将壁板结构截面形心作为中性层位

置,并通过试验或经验来修正,这种方法在工程中已经沿用了几十年^[1],但形心位置实际上只是弹性变形的中性层,对于发生塑性变形的弯曲,其中性层不仅仅在相对弯曲半径小时由于板料变薄而内移,在相对弯曲半径较大时也会不断移动,采用形心位置作为中性层位置会造成工程上很大的误差,有时甚至会导致部件的报废^[2]。对于平板和上下对称加筋壁板,中性层始终通过板料的形心,即几何中面层,对于弹性弯曲和塑性弯曲,其位置都始终不变;但对于非对称壁板,中性层往往难以确定,尤其对于发生塑性强化的弹塑性弯曲,中性层的位置不但与壁板几何形状有关,而且与弯曲半径、材料本构关系等有密切关系。

目前,学者对中性层的研究主要集中于在相对弯曲半径较小时平板中性层的移动^[3-5],而对于工程中常用的非对称整体壁板中性层的位置及其在弹塑性变形中的变化,没有见到相关文献涉及。本文通过弹塑性理论和非线性有限元仿真对整体壁板结构的中性层位置进行分析计算,为工程实际提供参考。

1 壁板弹性变形中性层位置

壁板加筋包括周向加筋和纵向加筋,如图1所示。在弯曲变形过程中,平行于弯曲方向的纵向加筋变形和应力都很小,对整个壁板的应力应变、变形及回弹影响较小,因此,在分析壁板弯曲及其中性层位置时,可以忽略纵向加筋的影响,将壁板分割为若干完全相同的单筋条结构进行分析。



图1 整体壁板结构

Fig.1 Integrally stiffened panel

单筋条几何尺寸如图2所示, z 为壁板中性层位置, e 为中性层离蒙皮底部的距离, b 为加筋网格间距(含加筋厚度)。壁板弯曲时, z 处应力应变都为0,应变沿厚度方向呈线性分布。

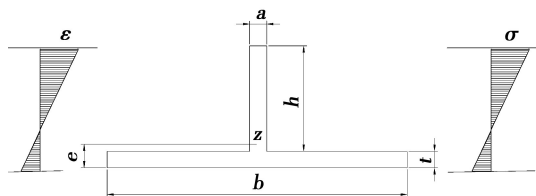


图2 壁板单筋条结构弹性变形阶段应力应变分布

Fig.2 Strain and stress distribution of single stiffener structure in elastic bending

设 ρ 为壁板中性层的弯曲半径, y 为材料与中性层的距离,则轴向应变为:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \frac{y}{\rho} \quad (1)$$

在弹性变形阶段,应力沿厚度方向也呈线性分布,由截面轴向应力合力为零可得:

$$e = \frac{ah^2 + 2aht + bt^2}{2(ah + bt)} \quad (2)$$

可见,整体壁板结构在弹性弯曲时,中性层通过截面形心。

2 壁板塑性变形中性层位置

壁板弯曲时,加筋顶部应力应变最大,当弯曲半径逐渐减小,加筋顶部应力应变不断增大,并首先开始屈服,进入塑性变形阶段,屈服部位逐渐向中性层扩展;对于通常采用高加筋的壁板结构,蒙皮在变形过程中始终处于弹性阶段。因此,当加筋发生塑性变

形时,正应力沿厚度方向不再呈线性分布,而与材料的塑性强化密切相关。由于材料塑性强化模量一般比弹性模量小,中性层两侧并不对称,因此拉伸应力和压缩应力合力不再为零,中性层位置会向蒙皮偏移,以达到应力平衡。

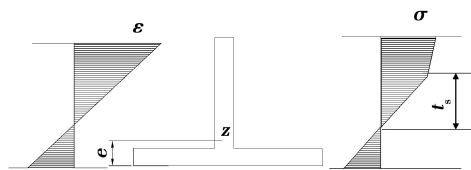


图3 单筋条结构件塑性变形阶段应力应变分布

Fig.3 Strain and stress distribution of single stiffener structure in plastic bending

加筋顶部发生屈服时,即满足 $\rho \leq \frac{E(h+t-e)}{\sigma_s}$ 时,壁板进入塑性变形阶段,中性层位置发生移动,其中 σ_s 为材料屈服强度, E 为弹性模量。在通常弯曲工况下,弹性变形和塑性变形在同一量级,都必须考虑。对于高加筋壁板,中性层蒙皮一侧始终处于弹性变形阶段,其轴向应力合力为:

$$F_1 = \frac{Ebe^2 + E(a-b)(e-t)^2}{2\rho} \quad (3)$$

设 t_s 为中性层加筋一侧弹性变形的厚度,有:

$$t_s = \frac{\rho\sigma_s}{E} \quad (4)$$

航天器整体壁板通常采用高强度铝合金,该合金在塑性变形中有明显的塑性强化效应,且接近于线性强化。文中分析采用如下所示的线性强化材料模型:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & 0 < \varepsilon < \varepsilon_s \\ \sigma_s + D(\varepsilon - \varepsilon_s) & \varepsilon \geq \varepsilon_s \end{cases} \quad (5)$$

式中, ε_s 为屈服应变, D 为线性强化模量。

于是,中性层加筋一侧轴向应力合力为:

$$F_2 = \int_0^{t_s} \frac{aEy}{\rho} dy + \int_{t_s}^{h+t-e} a \left(\sigma_s + \frac{Dy}{\rho} - \frac{D\sigma_s}{E} \right) dy$$

$$= \frac{a(E-D)t_s^2 + aD(h+t-e)^2}{2\rho} - a\sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right)(h+t-e-t_s) \quad (6)$$

根据截面应力平衡可以得到:

$$\frac{a(E-D)t_s^2 + aD(h+t-e)^2}{2\rho} - a\sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right) \cdot (h+t-e-t_s) - \frac{Ebe^2 + E(a-b)(e-t)^2}{2\rho} = 0 \quad (7)$$

由(7)式可求解整体壁板弹塑性弯曲位置参数 e 。由此可见,整体壁板在发生塑性变形时,中性层位置并不为截面形心,与壁板几何参数、材料本构参数和弯曲半径密切相关。

3 理论和数值仿真算例分析

本文以3个不同参数的加筋壁板为例,通过非线性航材材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第1期

性有限元软件 ABAQUS 对壁板弹塑性弯曲进行精细化建模并计算,通过计算的应力应变测量壁板在弹性弯曲时的中性层位置。并根据前述弹塑性分析方法对 3 种壁板中性层位置进行理论计算,获得壁板在不同弯曲半径下中性层位置参数的理论值。材料线性强化参数通过试验数据进行曲线拟合,拟合后弹性模量 E 为 65 GPa, σ_s 为 176.6 MPa, D 为 1 570.6 MPa。算例几何参数如表 1 所示。

对于蒙皮较厚的壁板,如算例 1 和 3,弹塑性中性层都位于蒙皮内;对于蒙皮较薄的壁板,如算例 2,弹性中性层位于加筋上,随着弯曲半径的减小逐渐偏移到蒙皮内。一般情况下,加筋截面积与蒙皮截面积之比越大时,中性层相对偏移量越大。

表 1 算例几何参数及材料

Tab.1 Typical geometric parameters and material mm

算例	加筋厚度 a	加筋高度 h	蒙皮厚度 t	网格间距 b	壁板材料
1	4	15	5	100	5A06
2	4	17.5	2.5	148	5A06
3	4	25	5	148	5A06

根据(7)式和数值仿真计算得到算例 1-3 在不同弯曲半径下的中性层位置参数 e ,见图 4~图 6。

从计算结果来看,壁板结构在弹性变形和塑性变形过程中,中性层位置相差很大。在弹性变形阶段,中性层始终不变,在截面形心上;而在塑性变形阶段,随着弯曲半径的减小,中性层向蒙皮一侧移动;采用线性强化材料模型的理论计算结果和数值仿真结果相差很小,表明采用典型单筋条结构替代整体壁板来分析和计算中性层位置是准确的。

由于 3 个算例都是高加筋壁板,对于所有的仿真工况,加筋顶部塑性变形较大,而蒙皮始终处于弹性阶段,这也验证了在弹塑性理论分析过程中蒙皮不发生屈服的假设是正确的。通过对壁板应变中性层和应力中性层的分别计算和测量,发现其应力中性层和应变中性层均平行于蒙皮表面,没有发生偏转,且二者几乎重合,表明在相对弯曲半径较大时($\rho/t \geq 10$),由于壁板变薄而产生的应力中性层和应变中性层的偏离可以忽略不计。

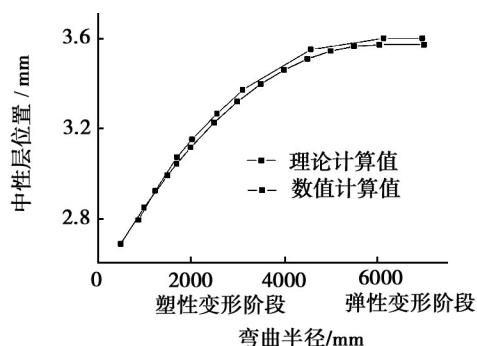


图 4 算例 1 壁板在不同弯曲半径下中性层位置

Fig.4 Positions of neutral surfaces of example 1 under different bending radiuses

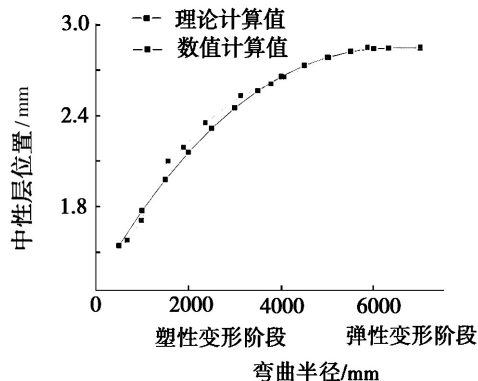


图 5 算例 2 壁板在不同弯曲半径下中性层位置

Fig.5 Positions of neutral surfaces of example 2 under different bending radiuses

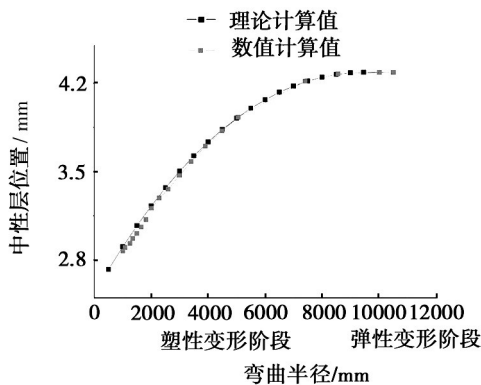


图 6 算例 3 壁板在不同弯曲半径下中性层位置

Fig.6 Positions of neutral surfaces of example 3 under different bending radiuses

4 结论

通过弹塑性分析,考虑了材料塑性强化效应,建立了一种便捷的计算整体壁板结构弹塑性弯曲中性层位置的方法,并和数值仿真结果进行了对比,分析结果表明:整体壁板结构弹性弯曲时,中性层位于截面形心;而进入塑性弯曲阶段,中性层位置和弯曲半径密切相关,随着弯曲半径的减小向蒙皮方向显著移动;在整体壁板常用的相对弯曲半径下($\rho/t \geq 10$),壁板的变薄可以忽略不计,应力中性层和应变中性层几乎重合。

参考文献

- [1] 朱觉新,王成文. 实用钣金技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009
- [2] 卓均之,童钢青,魏光辉. 非对称型钢冷弯中性层的可变性[J]. 轻钢结构,2002,17(2):7-9
- [3] 余同希,章亮焱. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1992
- [4] 官英平,赵军. 板料弹塑性弯曲应力应变中性层位置关系探讨[J]. 塑性工程学报,2002,9(2):39-41
- [5] Zhang Dongjuan, Cui Zhenshan, Xueyu Ruan, et al. A analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending[J]. Computational Material Science,2007,38(4):707-715

(编辑 任涛)